STRENX®1300 – ANALIZA PARAMETARA ZAVARIVANJA
STRENX®1300 – WELDING PARAMETERS ANALYSIS

Marko Horvat, Ivan Samardžić, Veljko Kondić, Živko Kondić

Ključne riječi: visokočvrsti čelici, S1300
Keywords: high-strength steels, S1300

Sažetak:
Strenx®1300 je ultračvrsti konstrukcijski čelik s minimalnom granicom razvlačenja od 1300 MPa. Primjenjuje se u specifičnim konstrukcijama – zahtjevi velikih opterećenja i male mase. U radu su prezentirana osnovna svojstva čelika Strenx®1300 s naglaskom na odabir i analizu parametara zavarivanja.

Abstract:
Strenx®1300 is an ultra high strength structural steel with a minimum yield strength of 1300 MPa. This steel is used in specific structures - requirements of high loads and low weights. This paper presents the basic properties of Strenx®1300 steel with emphasis on selecting and analyzing welding parameters.

1 UVOD

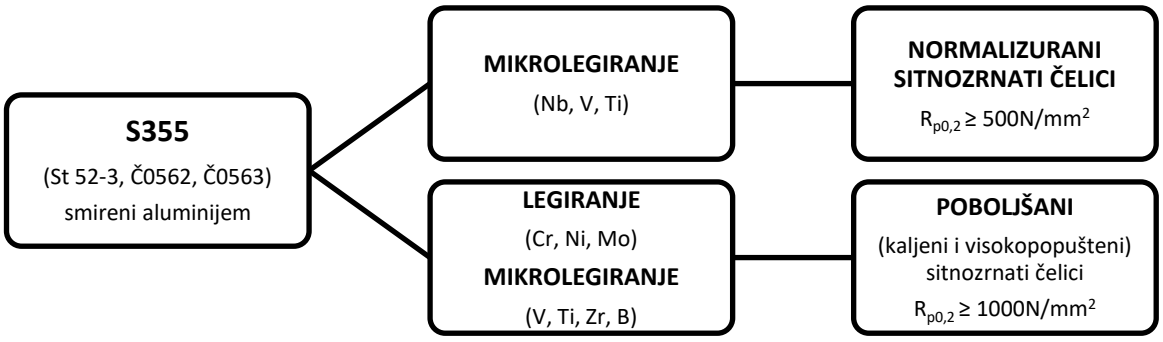
Strenx®1300 je trgovački naziv za ultračvrsti konstrukcijski čelik s minimalnom granicom razvlačenja od $R_{p0,2}$ min = 1300 MPa proizveden u SSAB-u, švedsko-američkom koncernu, vodećem u proizvodnji čelika istaknute čvrstoće i to tzv. naprednih visokočvrstih čelika (AHSS - Advanced High-Strength Steels) i Q&T (Quenched & Tempered) čelika.

Kako navodi i sam proizvođač, ovaj čelik ističe se odličnom zavarljivošću (bez obzira na vrlo visoku vrijednost granice razvlačenja) te vrlo dobrom čvrstoćom i žilavošću u zoni utjecaja topline, inače kritičnoj zoni za ovu grupu čelika. Također, ističu i vrlo dobro svojstvo žilavosti, nisku prijelaznu temperaturu te povoljna svojstva hladnog oblikovanja.

2 VISOKOČVRSTI ČELICI - RAZVOJ

Razvoj čelika istaknute čvrstoće može se smjestiti u prvu polovicu XX. stoljeća (završetak II. Svjetskog rata) i to kroz prvu fazu razvoja koja se temeljila na unapređenju čelika koji se tada najčešće koriste: Č0000 (St 33), Č0270 (USt34-1) i Č0370 (USt-37-1). Unapređenje je provedeno kroz smirvanje čelika (dodavanje Si) što je dalo pozizivan utjecaj na zavarljivost, a povećanjem udjela ugljika do 0,25% dobila se veća granica razvlačenja. Daljnje povećanje masenog udjela ugljika loše je utjecalo na zavarljivost i žilavost (iako je imalo pozitivan efekt na čvrstoću zbog rasta udjela perlita u mikrostrukturi), premda je to razdoblje u kojem se tehnologija spajanja zavarivanjem još nije nametnula kao dominanta. No, već početkom XX. stoljeća uvidio se utjecaj legirnih elemenata na povećanje granice razvlačenja. To je bila direktna posljedica mehanizma očvrsnuća supstitucijom te mehanizma povišenja perlita (pojedini legirni elementi pomiču eutektoidnu koncentraciju ugljika u niže vrijednosti). No, istovremeno, legirni elementi djelovali su pozitivno i na veličinu zrna (dodatni mehanizam očvrsnuća), a time i na prijelaznu temperaturu (sniženje prijelazne temperature). Ovaj efekt prvenstveno je osiguran kroz udio aliminija i dušika. Spoj AlN počinje nastajati pri višim temperaturama (1200 °C), ali isto tako, raspada se pri visokim temperaturama (potpuno tek iznad 1350 °C) što ima pozitivan utjecaj kod valjanja (zrno ostaje sitno), a isto tako i kod naknadnih obrada (zavarivanje) gdje sprečava rast austenitnog zrna sve do svojeg raspada (1050 °C). Ovakve činjenice osigurale su proizvodnju normiranog čelika istaknute čvrstoče S355 (St52-3) koji i danas ima značajnu primjenu pri izradi čeličnih konstrukcija. [1, 2]

Druga faza razvoja ove skupine čelika također se zasniva na usitnjenju zrna, i to najviše iz razloga zavarljivosti, gdje bi povećanje masenog sadržaja ugljika izazvalo probleme, kao i smanjenje svojstva žilavosti. Također, odstupilo se i od znatnog povećanja udjela legirnih elemenata. Pošto je očvrsnuće precipitacijom bilo je ograničeno zbog smanjenja prijelazne temperature, krenulo se idejom dodavanja legirnih elemenata (Nb, V, Ti, Zr) u vrlo malim postocima (mikrolegiranje) koji su smanjivali veličinu zrna, te spoznaji toplinske obrade čelika uz određeni postotak legirnih elemenata. Takav razvoj krenuo je u 2 smjera kako to prikazuje slika 1. [1, 2]



Slika 1. Shematski prikaz smjerova razvoja čelika – druga faza razvoja čelika istaknute čvrstoće [1]

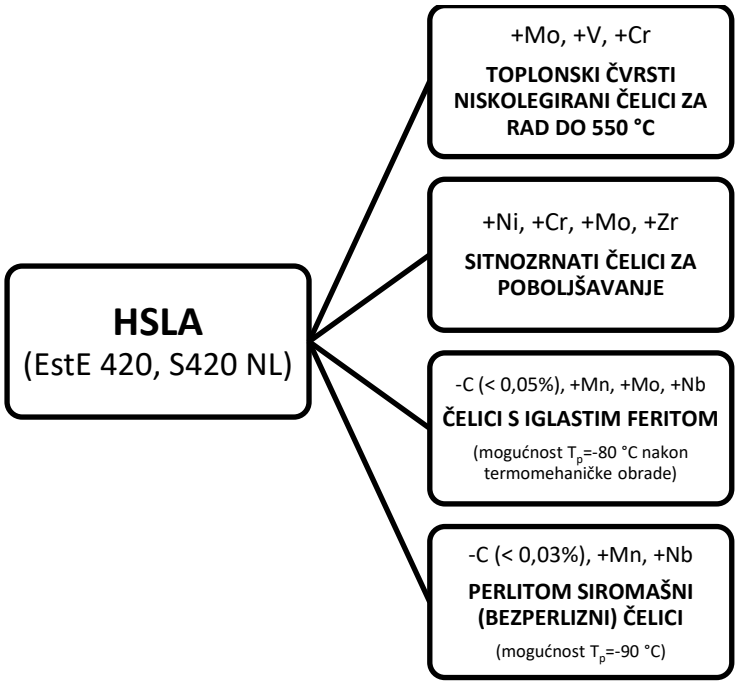
Ovakvi čelici poznati su i kao HSLA čelici (High Strenght Low Alloyed), a temeljem veličine granice razvlačenja dogovorno su podijeljeni i u skupine čelika povišene čvrstoće ($360 \leq R_{p0,2} \leq 500$ N/mm^2), čelika visoke čvrstoće ($R_{p0,2} = 500...1000$ N/mm^2) i ultračvrstih čelika ($R_{p0,2} > 1000$ N/mm^2). [1, 2]

Razvoj normalanih sitnozrnatih čelika omogućen je kroz danje usitnjenje zrna koje se temelji na disperzoidnim elementima koji se spajaju s ugljikom i dušikom te daju povoljan utjecaj na usitnjenje zrna (masen udio legirnih elemenata ispod 0,1%). Na ovaj način dolazi do kočenja gibanja dislokacija kroz mehanizme očvrsnuća usitnjenja zrna te mehanizam stvaranja precipitata, uz naglasak da na svojstva utječe i završna termomehanička obrada materijala. Poboljšani sitnozrnati čelici mogli bi se svrstati u treću fazu razvoja koja će biti opisana u slijedećem poglavlju. [1]

Osim navedenih grupa čelika istaknute čvrstoće, važno je za naglasiti da se drugoj polovici XX. stoljeća, a posebno 90-tih godina, ovi čelici iz nekih segmenata industrije (pogotovo u automobilskoj industriji) istiskuju novom grupom materijala – AHSS (Advanced High Strength Steels). U usporedbi s HSLA čelicima, ovi čelici pružaju veću deformabilnost za jednaku razinu čvrstoće. To su obično martenzitni čelici, ponekad sa jednom ili više dodatnih faza koja poboljšava deformabilnost. Također, ukoliko se gleda vrijednosti granice razvlačenja kao osnovni kriterij klasifikacije ove grupe materijala, susrećemo se i sa izrazom ultračvrsti čelici, čelici sa vrijednostima granice razvlačenja preko 1000 N/mm^2. Ovdje nebi trebalo razlikovati HSS i AHSS, a djelomična sistematizacija može i temeljiti na procesima dobivanja ovih materijala (nehrđajući PH čelici, maraging čelici, termomehanički obrađeni, poboljšani itd.). [1, 2, 3, 4, 5, 6]

3 POBOLJŠANI SITNOZRNATI ČELICI

Kao sto je navedeno, poboljšani sitnozrnati čelici čine prijelaz iz druge u treću fazu razvoja čelika istaknute čvrstoće. Sitnozrnati HSLA (EstE 420, S420 NL) dalje se razvojao u nekoliko smjerova, kako to prikazuje slika 2. [1]



Slika 2. Shematski prikaz razvoja sitnozrnatih čelika [1]

Uobičajeni čelici za poboljšavanje sadrže veći postotak ugljika (najčešće od 0,3 do 0,6 %C), no ova grupa materijala imala je i dodatni kriterij zavarljivosti, tako da je sadržavala do 0,22% C. Smanjenje postotka ugljika za posljedicu je imalo i smanjenje čvrstoće koja se pak nije mogla nadoknaditi legiranjem da se nebi povećala vrijednost Ce. Također, postojala je i opasnost od popuštanja čelika u ZUT-u nakon zavarivanja. Sa Mo i Cr pokušalo se smanjiti otpornost na popuštanje (što je bio jedan od prvih koraka u razvoju ove grupe materijala) te na utjecaj perlitne i bainitne pretvorbe. Ovi čelici imali su visoki Ce, a vrijednsti Rp0,2 nisu bile željene (bainitnom pretvorbom pri nižim temperaturama dobila se visoka vrijednost Rp0,2, ali visoke napetosti koje su bila posljedica istog, morale su se eliminirati visokim popuštanje čime su vrijednosti Rp0,2 padale ispod 500 N/mm2). Ove spoznaje dovele su do današnjih suvremenih niskougljičnih niskolegiranih sitnozrnatih čelika, u koju skupinu bi se mogao svrstati i čelik S1300. [1, 2]

Ovi čelici isporučuju se u poboljšanom stanju – kale se u čeličani s temperature oblikovanja i kale u vodi, potom se popuštaju (temperatura popuštanja 680...710 °C). Osnovna koncepcija kemijskog sastava temelji se na:

- što niži postotak ugljika radi osiguravanja zavarljivosti
- legiranje/mikrolegiranje koje omogućava prokaljivost na barem 90% martenzita (i/ili bainita) u jezgri
- mogućnosti postizanja niskougljičnog martenzita i/ili donjeg bainita već kod hlađenja na zraku tako da se oa i OM

- potreba visoke Ms kako bi nastali martnezit samopopustio već pri ohlađivanju između Ms i 20 °C
- sadržaju legirajućih elemenata koji omogućavaju sigurno izbjegavanje ferita hlađenjem na zraku (Mo, B, Cr). [1]

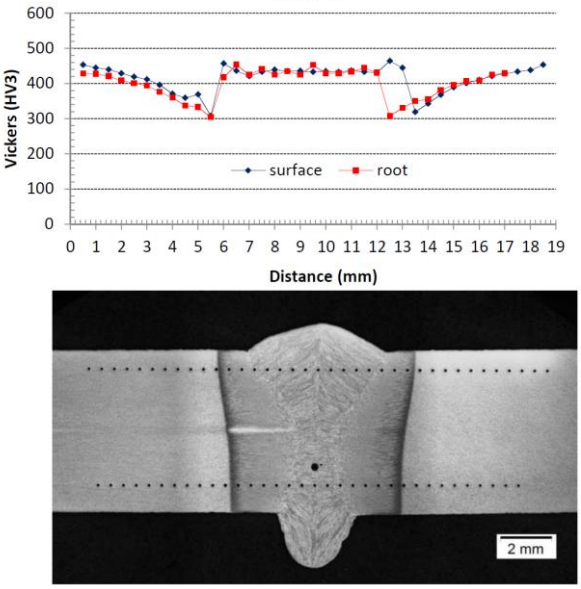
Iz navedenog slijedi da kod ove grupe materijala sudjeluje više mehanizama očvrsnuća: mehanizam očvrsnuća stvaranjem kristala mješanaca, mehanizam očvrsnuća stvaranjem novih dislokacija (kaljenje), mehanizam očvrsnuća stvaranjem precipitata i raspršenih čestica (vrlo malo) te mehanizam očvrsnuća usitnjenja zrna. Također, iz kemijskog sastava te mikrostrukture vidljivo je da će toplinski utjecaji imati značajan utjecaj na promjenu iste. Prvenstveno se to odnosi na zavarivanje, gdje se unešeni toplinski input može promatrati i kroz vrijednost t8/5. Općenito se može reći, veće vrijednosti toplinskog inputa povećavaju t8/5 što za posljedicu može imati pad čvrstoće i povišenje prijelazne temperature (eventualni ulazak u feritno područje povećava mogućnost inicijacije pukotine), dok male vrijednosti t8/5 mogu dovesti materijal u strukturu 100% martenzita. [1]

4 ZAVARIVANJE POBOLJŠANIH SITNOZRNATIH ČELIKA

Zavarivanje poboljšanih sitnozrnatih čelika vrlo je zahtjevan postupak gledano sa aspekta svih tehnološkoh utjecajnih faktora na ovu tehnologiju spajanja materijala, a prvenstveno kroz unos topline i režime rada te odabir dodatnog i pomoćnog materijala. Općenita načela mogu se sve sti na:

- izbjegavanje stvaranja tvrdih i krhkih faza (konstituenata) – vrijednosti $t_{8/5}$ ne smiju biti premale da kako se nebi stvarao igličasti martenzit
- izbjegavanje stvaranja ferita (poligonalnog) u zavaru (ferit je najčešća inicijacija pukotina) - vrijednosti $t_{8/5}$ ne smiju biti prevelike
- minimizirati pad tvrdoće u ZUT-u koji se pri zavarivanju našao pri temperaturi između temperature popuštanja i A1 (tzv. "jarak tvrdoće"). [1]

Spomenuti "jarak tvrdoće" nije moguće izbjeći. Važno ga je minimizirati, tj., utjecati na njegovu geometriju. Manji toplinski imput osigurat će minimiziranje u pogledu "širine jarka tvrdoće", dok će otpornost na popuštanje osigurati njegovu što manju "dubinu". Prikaz specifičnog "jarka tvrdoće" za čelik S1300 s malim $t_{8/5}$ prikazuje slika 3. [1]



Slika 3. Tvrdoća zavarenog spoja: S1300, X90I-G, $t_{8/5}$=3,1s

15072-1[9]

Npr. molibden, omogućuje postizanje bainita ohlađivanjem na zraku iz područja austenita (otpornost na popuštanje). Također, vrlo je važno naglasiti opasnost od ulaska vodika u zavareni spoj što može imati vrlo ozbiljne posljedice kod ove skupine materijala. [1]

Višim vrijednostima dopuštenih naprezanja u radu i eksploataciji, smanjuju se poprečni presjeci strojnih elemenata i konstrukcija što pozitivno utječe na niz faktora: od smanjenja mase i volumena strojnog dijela i konstrukcije, tehnoloških aspekata, transportnih troškova mehaničkih karakteristika konstrukcije pa sve do u konačnici manjih troškova izrade. Upravo to je omogućeno kroz razvoj čelika istaknute čvrstoće. Danas ova grupa materijala nalazi sve veću primjenu u metaloprerađivačkoj industriji, i to više ne samo kod specijalnih konstrukcija. Današnjim tehnološkim procesima, a posebno razvojem procesa zavarivanja, omogućena je nesmetana primjena ovakvih materijala, gdje se uz kontrolu procesa može garantirati zadržavanje mehaničkih i ostalih svojstava kakva sadrži i osnovni materijal. Za očekivati je daljni razvoj visokočvrstih čelika, ali prvenstveno sve veća primjena u svim područjima vezanim uz čelične konstrukcije s naglaskom na tranportne sustave, podiznu opremu, industriju strojeva, zrakoplovnu industriju itd. [1, 2, 7, 8, 9, 10]

5 S1300 – SVOJSTVA I ZAVARLJIVOST

Kao što je navedeno, Strenx 1300 (SSAB) je UHSS čelik, i kategorizira se u grupu QT čelika. Dobiva se postupkom poboljšavanja (gašenje + popuštanje), a njegova primjena trenutno je dosta ograničena zbog zahtjevnih parametara zavarivanja te izbora dodatnog materijala. Kemijski sastav čelika Strenx 1300 prikazan je u Tablici 1, a važnija mehanička svojstva i Tablici 2 i 3.

Tablica 1. Kemijski sastav - S 1300 [7]

C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Cu (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)	B (max %)
0,25	0,50	1,40	0,010	0,003	0,80	0,30	3,0	0,70	0,005

Tablica 2. Osnovna mehanička svojstva - S 1300 [7]

Debljina (mm)	$R_{p0,2}$ (min MPa)	R_m (min MPa)	A_5 (min %)
4.0 – 15.0	1300	1400-1700	8

Tablica 3. URL - S 1300 [7]

Vrsta:	URL (Charpy V 10×10mm)
Strenx 1300 E	27 J / -40 °C
Strenx 1300 F	27 J / -60 °C

Čelici kao što je Strenx S1300 prvenstveno se koriste zbog vrijednosti čvrstoća koje osiguravaju manje presjeke konstrukcija, manju težinu konstrukcija te ukupne niže troškove (bez obzira na veću cijenu OM). Opravdanost takve primjene prikazan je tablicom 4. Njihova primjena bazira se na izradi dizalica, kranova, transportnih sistema, cjevovoda. offshore industriji i sl. Iz tog aspekta, jedan od uvjeta je dobra zavarljivost. [7, 8, 9, 10]

Tablica 4. Primjena visokočvrstih čelika – primjer [7]

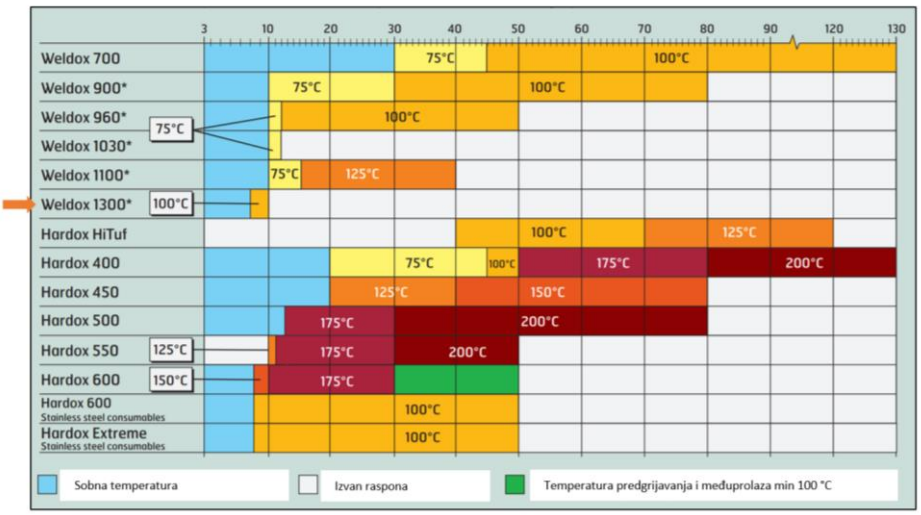
	S235	**S355**	**S460**	**S690**	**S960**	**S1100**	**S1300**
$R_{p0,2}$ [Mpa]	235	355	460	690	960	1100	1300
Debljina materijala [mm]	40,0	26,2	20,4	13,6	9,6	8,2	7,2
Debljina materijala [%]	100	35,5	51	34	24	20,5	18
Površina zavarenog spoja (X zavar 60°) [cm2]	4,62	1,98	1,20	0,53	0,27	0,19	0,15
Površina zavarenog spoja (X zavar 60°) [%]	100	42,9	26	11,5	5,8	4,1	3,2

Zavarljivost ove grupe materijala prvenstveno osigurana kroz nizak udio ugljika (do max 0,25 %). Općenito gledano, mogu se zavarivati svim konvencionalnim postupcima uz naglasak na konstolu istog. Preporuke za izračun vrijednosti C_e mogu se uzeti prema metodi CET (za kraća vremena hlađenja i za ocjenu sklonosti hladnim pukotinama) te metodi CEV (za čelike s udjelom ogljika većim od 0,18%). [7, 8, 9, 10]

CET	CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40	**CET = 0,43**
CEV	CEV = C + Mn/6 + (Cu+Ni)/15 + (Cr+Mo+V)/5	**CEV = 0,67**

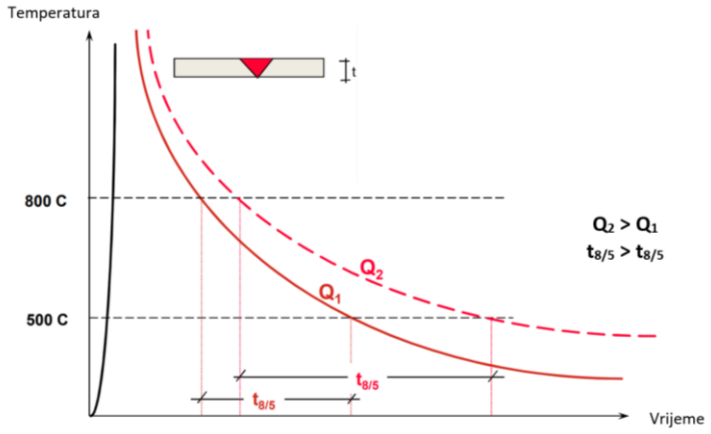
Ovdje je važno za naglasiti da se radi o izračinima za maksimalne vrijednosti elemenata kemijskog sastava što je u praksi teško postizivo te su navedene vrijednosti uvijek manje. Oboje metode pokazuju uzimanje u obzir potupka predgrijavanja. Općenito, može se reći da temperatura predgrijavanja ovisi o CET-u, debljini materijala, udjelu difundiranog vodika, unosu topline i razini unutrašnjih naprezanja u materijalu. Temperatura predgrijavanja može se izračunati sukladno EN ISO 1011-2, no prema preporukama proizvođača pokušava se pri manjim debljinama izbjegavat predgrijavanje ili je njegova vrijednost oko 100 °C (osim ako radno okruženje nije na niskoj temperaturi, tada je predgrijavanje obavezno). [7, 8, 9, 10]

Ovdje je važno za naglasiti da se radi o izračinima za maksimalne vrijednosti elemenata kemijskog sastava što je u praksi teško postizivo te su navedene vrijednosti uvijek manje. Oboje metode pokazuju uzimanje u obzir potupka predgrijavanja. Općenito, može se reći da temperatura predgrijavanja ovisi o CET-u, debljini materijala, udjelu difundiranog vodika, unosu topline i razini unutrašnjih naprezanja u materijalu. Temperatura predgrijavanja može se izračunati sukladno EN ISO 1011-2, no prema preporukama proizvođača pokušava se pri manjim debljinama izbjegavat predgrijavanje ili je njegova vrijednost oko 100 °C (osim ako radno okruženje nije na niskoj temperaturi, tada je predgrijavanje obavezno). [7, 8, 9, 10]



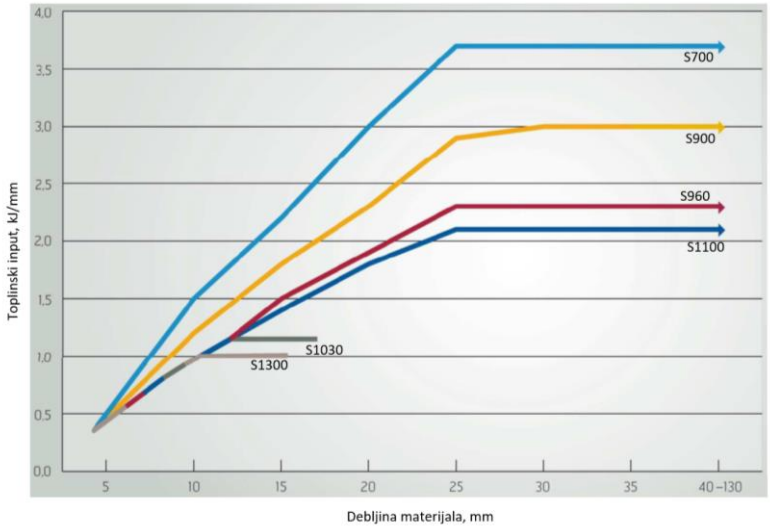
Slika 4. Preporučene temperature predgrijavanja i međuprolazne temperature [10]

Istovremeno, preporuča se temperaura međuprolaza oko 200 °C. Ovime se pokušava minimalizirazi ukupni toplinski input koji ima veliki utjecaj na $t_{8/5}$. Vrijednost $t_{8/5}$ ima vrlo uske vrijednosti za čelik S1300, ona iznosi 5-15 sekundi. Veće vrijednosti smanjit će vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja te žilavost, dok će kraći $t_{8/5}$ također loše utjecati na žilavost, a osobito na mogućnost pojave uključinskih pogrešaka, slika 5. [7, 8, 9, 10]



Slika 5. Utjecaj veličine toplinskog inputa na vrijeme $t_{8/5}$ [9]

S aspekta utjecaja na $t_{8/5}$ (bez obzira na model izračuna), vidljivo je da ne postoje velike mogućnosti korekcija, osim kroz toplinski input, što se u konačnici najčešće manifestira kroz brzinu zavarivanja.



Slika 6. Preporučene max vrijednosti toplinskog inputa (prema minimalnim vrijednostima temperatura predgrijavanja) [10]

Brzine zavarivanja mogu dosezati visoke vrijednosti te nikako ne treba isključivati poluautomatizaciju/automatizaciju procesa koji će osigurati konstantan i preporučen toplinski input (kroz definirane parametre i brzinu zavarivanja), a time i osigurati mehanička svojstva koja teže mehaničkim svojstima osnovnog materijala. Ipak, treba naglasiti da će statička čvrstoća zavara ovisiti i vrsti dodatnog materijala, što je u principu još jedan dodatan problem kod čelika S1300 jer trenutno na tržištu ne postoji adekvatan dodatni materijal, no s obzirom na mikrostrukturne promjene uzrokovane procesom zavarivanja, sa trenutnim dodatnim materijalom mogu se uz kontrolu procesa dobiti zadovoljavajuća mehanička svojstva zavarenog spoja. Ovaj problem se također može riješiti geometrijom konstrukcije, tj. pozicioniranjem zavarenih spojeva u zone opterećenja koje ne dosežu vrijednosti granice razvlačenja. [7, 8, 9, 10]

6 ZAKLJUČAK

Sve veći zahtjevi koji se postavljaju na čelične konstrukcije, kao i zahtjevi za smanjivanjem troškova, doveli su do intenzivnijeg razvoja čelika istaknute čvrstoće, kako konstrukcijskih čelika, tako i čelika posebnih namjena. Pri tome, kada se govori o konstrukcijskim čelicima osnovna zadaća bila je osiguranje zavarljivosti, tj. osiguravanje zadovoljavajućih mehaničkih i ostalih svojstava nakon tehnoloških procesa čija je posljedica toplinski input. Zbog specifične mikrostrukture i kemijskog sastava koja osigurava visoke vrijednosti granice razvlačenja, proces zavarivanja otežan je u smislu kontrole procesa kroz osnovne parametre kako bi se osigurala potrebna mehanička svojstva (svojsta slična svojstvima OM) i kvaliteta zavarenog spoja. U radu su dani naglasci na osnovne pojmove o kojima valja voditi računa prilikom izrade tehnologije zavarivanja (Ce, toplinski input, predgrijavanje, $t_{8/5}$ itd.). Danas prilikom izrade tehnologije zavarivanja ove grupe materijala

svakako valja koristiti i softverska rješenja, uglavnom od proizvođača osnovnih materijala, koji mogu dati dobar smjer za izradu osnovnih parametara za zavarivanje. Također, treba naglasiti i problematiku dodatnog materijala. Dodatni materijali su još u fazi razvoja, a njihov odabir ima značaja utjecaj, ne samo gledaći kroz mehanička svojstva, nego i utjecaj na samu mikrostrukturu zone taljenja.

7 REFERENCE

[1] M. Novosel, D. Krumes: Posebni čelici, Slavonski brod, 1998.

[2] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2002.

[3] Mahmoud Y. Demeri: Advanced High-Strength Steels: Science, Technology, and Aplications, Ohio, 2013

[4] E. Billur, J. Dykeman, T. Altan: Three Generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part II, 2014.

[5] Advanced high strenght steel through paraequilibrium carbon partitioning and austenite stabilization, Ohio, 2011.

[6] D.Krizan: Development of third generation advanced high strength steels for automotive applications, Austria, 2018.

[7] Strenx® 1300 - The ultra-high-strength steel at 1300 MPa, (https://www.ssab.com/products/brands/strenx/products/strenx-1300), preuzeto: kolovoz/rujan 2019.

[8] Čelici visoke čvrstoće, Böhler Welding, Seminar, Tuzla, 25.02.2016.

[9] Welding of Strenx, SSAB, prezentacija (interni document SSAB)

[10] Welding handbook – SSAB - A guide to better welding of Hardox and Weldox, 2009.